

**Архипов Александр Геннадьевич**

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРА-  
МЕТРОВ НА ЦЕЛОСТНОСТЬ ПОДИНЫ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕК-  
ТРОЛИЗЕРОВ ПРИ ОБЖИГЕ**

**Специальность**  
**05.16.02 – Metallургия черных, цветных и**  
**редких металлов**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Екатеринбург – 2013**

Работа выполнена на кафедре металлургии цветных металлов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".

Научный руководитель: - доктор химических наук, профессор  
ПОЛЯКОВ Петр Васильевич

Официальные оппоненты: - ПРОШКИН Александр Владимирович  
доктор технических наук, профессор, ООО  
«РУСАЛ-ИТЦ», начальник лаборатории  
углеродных и футеровочных материалов

- КОЖЕВНИКОВ Георгий Николаевич  
доктор технических наук, профессор,  
ФГУБН Институт металлургии УрО РАН,  
заведующий лабораторией электротермии

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт  
высокотемпературной электрохимии  
Уральского отделения РАН

Защита диссертации состоится **«24» декабря 2013 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28, зал Ученого совета Института материаловедения и металлургии, аудитория МТ-329.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат диссертации разослан «23» ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

С.В. Карелов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из основных причин преждевременного выхода из строя алюминиевого электролизера является нарушение целостности подины, и, как следствие, протек расплава к блумсам и в цоколь ванны. Одним из главных факторов, влияющих на целостность подины (25% значимости, по данным Солхейма и Ойе) является технология обжига и пуска электролизера. Поэтому проблема выбора оптимального метода обжига и пуска электролизера является актуальной задачей для алюминиевой промышленности.

При создании технологии обжига необходимо с высокой точностью спрогнозировать, к чему приведут те или иные действия и технические решения. Большая стоимость электролизеров и длительный срок проверок правильности принятых технических решений исключают возможность выбора оптимальной технологии обжига новой конструкции или существующих электролизеров методом проб и ошибок, поэтому возникает необходимость компьютерного моделирования физических полей.

Применение компьютерного моделирования позволяет провести глубокий анализ влияния конструкции электролизера и технологии обжига на его физические поля и целостность подины при обжиге. Вышеперечисленные причины определили необходимость создания компьютерных моделей и методик расчета физических полей в электролизере при двух наиболее распространенных в алюминиевой промышленности России способах обжига.

В настоящее время существует ряд пакетов программ, таких как ANSYS, Star-CD и других, предназначенных для математического моделирования физических явлений. В связи с этим, становится актуальным применение этих пакетов для моделирования обжига алюминиевого электролизера. Создание объемных компьютерных моделей электролизеров при обжиге, разработка методик расчета температурного, электрического, газодинамического полей и напряженно-деформированного состояния (НДС) позволит провести детальный анализ технологии обжига электролизера, влияния тех или иных изменений в конструкции электролизера, в графике обжига, применение тех или иных технических решений на его температурное поле и целостность подины при обжиге.

Для проведения математического моделирования необходимо знать физико-механические свойства материалов. Особо стоит отметить влияние свойств подовой массы на целостность подины при обжиге, поэтому становится актуальным измерение свойств подовой массы, а также изучение влияния скорости обжига на физико-механические свойства подовой массы.

Другой актуальной задачей является измерение свойств коксовой крупки, которая используется для электрического обжига электролизеров, т.к. в литературе данные о свойствах не встречаются, а для математического моделирования их знать необходимо.

Учитывая выше сказанное, проблема выбора оптимального метода обжига и пуска электролизера является актуальной задачей для алюминиевой промышленности.

## **Цель работы и задачи исследования.**

Целью работы является: повышение срока службы электролизеров за счет выбора оптимальных, с точки зрения целостности подины, технологии обжига на коксе и пламенного обжига электролизеров с помощью математического моделирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создать компьютерные трехмерные модели электролизеров при обжиге, с высокой точностью повторяющие геометрию действующих электролизеров;
2. На основе компьютерных моделей электролизеров разработать:
  - 2.1. Методику расчета температурного и электрического полей в электролизере при обжиге на коксе;
  - 2.2. Методику расчета температурного поля электролизера при пламенном обжиге с учетом движения газовой среды путем использования эффективных коэффициентов теплопроводности;
  - 2.3. Методику расчета температурного поля электролизера при пламенном обжиге с учетом движения газовой среды и горения топлива путем решения задачи трехмерной газодинамики и сопряженного теплообмена;
  - 2.4. Методику расчета напряженно-деформированного состояния катодного устройства при обжиге на коксе и пламенном обжиге;
3. Разработать методику определения контактного сопротивления «коксовая крупка – подовый блок»;
4. Провести экспериментальные исследования физико-механических свойств подовой массы и коксовой крупки, исследования влияния изменения режимов обжига на физико-механические характеристики подовой массы и исследования по определению удельного электрического сопротивления контакта «коксовая крупка – подовый блок»;
5. Провести расчеты температурных, электрических полей электролизера и напряженно-деформированного состояния катодного устройства с различной конструкцией и разным регламентом обжига на коксе и пламенного обжига, определить оптимальную с точки зрения целостности подины технологию обжига на коксе.
6. Провести анализ выполненных расчетов. По результатам расчетов определить оптимальную с точки зрения целостности подины технологию обжига на коксе и пламенного обжига.

**Методы анализа.** В процессе выполнения работы при помощи прикладных пакетов программ ANSYS и Star-CD, основанных на методе конечных элементов и методе контрольного объема соответственно, созданы компьютерные трехмерные модели действующих электролизеров. При помощи пакета ANSYS проведены расчеты температурного, электрического полей и напряженно-деформированного состояния электролизеров. При помощи пакета Star-CD проведены расчеты температурного поля электролизера, газодинамики и горения топлива в газовой среде при пламенном обжиге. Проведено сравнение расчетных данных с практическими заме-

рами температур и деформаций действующих электролизеров при обжиге. Проведена оценка температурных полей и целостности катодного устройства при обжиге рассмотренных электролизеров. При выполнении работ в рамках диссертации использованы положения теории теплопроводности, электропроводности, аэродинамики, термоупругости, металлургии алюминия, данные лабораторных испытаний, результаты практических замеров и справочные данные.

Исследования физико-механических свойств материалов проводились на лабораторных установках для исследования свойств материалов по аттестованным методикам.

### **Научная новизна работы.**

- Создана методика расчета трехмерных температурных, электрических полей электролизера и НДС катодного устройства при обжиге на коксе, позволяющая оценить влияние технологии обжига и конструкции электролизера на температурное поле и целостность подины.
- Создана методика расчета трехмерных температурных, газодинамических полей электролизера и НДС катодного устройства при пламенном обжиге, позволяющая оценить влияние технологии обжига и конструкции электролизера на температурное поле и целостность подины.
- Выявлены закономерности зависимости температурного поля, целостности и обжата подины электролизера при обжиге от таких параметров, как: конструкция и материалы катодного устройства, степень графитизации подового блока, время обжига, степень укрытия периферийных швов, диаметр анодных ниппелей и различных технических решений для улучшения качества обжига.
- При помощи компьютерного моделирования впервые выявлено, что причинами, вызывающими разрушения крайних подовых блоков при обжиге являются совокупность высокого температурного градиента и низкой жесткости торцевого периферийного шва и бровки.
- Установлено, что изменение скорости обжига подовой массы с 50 до 100 °С/ч в интервале температур 0-250°С не влияет на физико-механические свойства подовой массы, за исключением теплопроводности, которая уменьшилась в 1,2 раза при увеличении скорости обжига в интервале температур 0-250°С.
- Получены новые данные по физическим свойствам коксовой крупки и определено контактное сопротивление «коксовая крупка – подовый блок».

**Практическая значимость и реализация работы.** Разработанные методики и полученные результаты активно используются в Инженерно-технологическом центре компании РУСАЛ для разработки и отработки технологии обжига для разных типов электролизеров. На данный момент по результатам данной работы выполнено следующее:

1. Разработаны и запатентованы технические решения для устранения разрушения крайних подовых блоков электролизеров при обжиге на коксе, которые использованы на опытных электролизерах РА-300.

2. По результатам расчета изменен график подъема температуры подины во время обжига на коксе электролизеров С-190, С-255 3<sup>й</sup> и 4<sup>й</sup> серии ОАО "РУСАЛ Саяногорск" для снижения вероятности протексов расплава в цоколь электролизера после пуска. Внедрение изменений показало снижение количества протексов.
3. По результатам представленных в работе расчетов и рекомендаций изменена технология пламенного обжига электролизеров на ОАО "РУСАЛ Братск", что привело к снижению количества протексов расплава в цоколь в послепусковой период работы.
4. Представленные методики расчета использовались для разработки регламента пламенного обжига новых мощных электролизеров РА-300 и РА-400.
5. Результаты измерения физико-механических свойств подовой массы и коксовой крупки используются в компьютерных моделях при проведении расчетов.
6. Проведены расчеты для выбора регламента подъема силы тока при сухом пуске электролизеров для алюминиевых заводов в Богучанах, Тайшете и АЗ ALSCON.

#### **На защиту выносятся.**

- Эффективность и адекватность представленных методик расчета температурных, электрических полей, поля скоростей движения газовой среды, прочностных расчетов, определения целостности подины и возможности нарушения целостности катодного устройства при обжиге электролизеров;
- Выявленные закономерности по влиянию конструкции электролизера и технологии обжига на температурное поле и целостность катодного устройства при обжиге;
- Причины и механизмы разрушения крайних подовых блоков и предложенные технические решения по устранению этих разрушений;
- Полученные результаты по физико-механическим свойствам подовой массы и коксовой крупки.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались на X Международной конференции «Алюминий Сибири – 2004», г. Красноярск, 7-10 сентября 2004г. На XI Международной конференции «Алюминий Сибири – 2005», г. Красноярск, 13-15 сентября 2005 г. На XIV Международной конференции «Алюминий Сибири – 2008», г. Красноярск, 10-12 сентября 2008 г. На 3 Международной конференции пользователей программного обеспечения CADFEM, г. Москва, 22-23 апреля 2004 г.

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 13 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, получены 3 патента на изобретение.

**Структура работы.** Материал диссертации изложен на 214 страницах, включая 48 рисунков и 23 таблиц. Работа состоит из литературного обзора, включающего 1 главу, изложения методики расчетов, включающего 1 главу, экспериментальной

части, включающей 1 главу, расчетно-аналитической части, включающей 2 главы, выводов, списка используемых источников (87 наименований).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проведен краткий обзор теории электролитического получения алюминия, подробно рассмотрено устройство электролизеров, приведено описание и назначение каждого элемента его конструкции. Рассмотрены задачи обжига. Приведено описание известных способов обжига электролизеров, описаны их положительные и отрицательные стороны. Сделан вывод, что наибольшее распространение в мировой алюминиевой промышленности получили 2 способа обжига: обжиг на коксе и пламенный обжиг.

Рассмотрены причины нарушения целостности подины при обжиге, пуске и послепусковом периоде, изложенные в литературе. Проведен обзор экспериментальных методов исследования обжига, пуска и послепускового периода. Из него следует, что нет единого мнения по оптимальным параметрам различных видов обжига.

Выполнен обзор математических моделей, использовавшихся ранее для исследования процессов при обжиге алюминиевых электролизеров. Существует несколько работ, в которых применена 3D модель электролизера, позволяющая рассчитать температурное поле и термические напряжения во время обжига на коксе. В двух работах по заданному температурному полю проводится расчет термических напряжений в катодном устройстве электролизера после обжига. Нет ни одной работы, где была бы разработана 3D модель пламенного обжига, позволяющая рассчитать газодинамику и горение топлива во время обжига. Это позволило бы оценивать влияние на целостность подины не только изменения конструкции катодного устройства, но и изменения технологии обжига.

Исходя из сказанного, поставлена задача с помощью прикладных пакетов программ ANSYS Multiphysics и Star-CD разработать термоэлектрическую модель обжига на коксе и газодинамическую модель с сопряженным теплообменом и горением топлива для оценки влияния конструктивных и технологических изменений на целостность подины электролизеров при обжиге.

Для правильного решения задачи необходимо точное знание свойств материалов, поэтому для выполнения вышеуказанной задачи, сначала необходимо исследовать свойства подовой массы и коксовой крупки. Свойства остальных материалов были исследованы ранее или взяты из литературы.

**Во второй главе** подробно рассматриваются методики расчетов, разработанные в диссертации. В начале второй главы представлены основные уравнения теории теплопроводности и электропроводности, уравнения теории термоупругости, пластичности, уравнения тепломассопереноса и горения. Для расчетов использовались: конечно-элементный пакет ANSYS и пакет для вычислительной гидродинамики Star-CD, использующий метод контрольного объема.

Далее рассматриваются этапы создания и проведения термоэлектрических расчетов электролизеров при *обжиге на коксе*.

По чертежам и технологической инструкции обжига созданы объемные конечно-элементные модели четверти электролизера на силу тока 300 кА при разных вариантах обжига на коксе.

Модель четверти электролизера состоит из множества конечных элементов (около 100 000) и с высокой точностью повторяет геометрию действующего или проектируемого аппарата. Термоэлектрическая модель включает в себя следующие части, выполненные по рабочим чертежам или с необходимыми изменениями: кожух и футеровку катодного устройства; обожженные аноды со штангами; анодную шину с частью стояков и катодные спуски с частью катодных шин; слой нефтяного прокаленного кокса между подиной и анодами; пространство борт-анод и верх анодов, засыпанные флотационным криолитом. Пространство между анодами заполнено воздухом, а сверху закрыто теплоизоляционным картоном.

После построения модели задаются свойства материалов футеровки, стали и анодов: плотность материала, удельная теплоемкость, удельное электрическое сопротивление, удельная теплопроводность. Эти свойства были либо взяты из литературных данных, либо измерены на измерительных комплексах ИК-4 и ТЭП в лаборатории ООО «НТЦ ЭЛТЕР». Комплексы ИК-4 и ТЭП измеряют теплопроводность, электропроводность, натриевое расширение, термическое расширение и усадку, прочность на сжатие и модуль упругости при высоких температурах. Подробное описание измерительных комплексов приведено в главе 3.

Далее задаются граничные условия (ГУ). При расчетах температурного поля задаются температурная зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи, степень черноты излучаемого тела, температура окружающей среды, сила тока, изменяющаяся во времени, и нулевой электрический потенциал.

Задается начальная температура всего электролизера, равная температуре окружающей среды.

Далее проводится нестационарный термоэлектрический расчет от начала до 72 часов обжига с шагом 4 часа.

В диссертации описывается адаптация модели и сравнение с экспериментальными данными по температуре поверхности подины и катодного кожуха, которое показало хорошее совпадение рассчитанных и измеренных данных.

Расчет *температурных полей при пламенном обжиге с учетом тепломассопереноса и горения топлива* проводился в пакете Star-CD.

Решение сопряженной задачи прямым методом, когда совместно выполняется газодинамический нестационарный расчет с горением и нестационарный расчет теплопроводности в твердом теле, требует очень маленького шага по времени. Тестовые расчеты показали, что для устойчивого счета размер временного шага не должен превышать 0,1 секунды, иначе газодинамическая задача становится неустойчивой и решение «разваливается». Выполнить расчет 72 часов обжига с таким временным шагом не представляется возможным на имеющейся вычислительной технике.

Из-за значительной разницы в характерных временах процессов в газовой фазе и твердом теле можно считать поле скоростей газовой среды постоянным в определенный промежуток времени, что позволяет "замораживать" поле скоростей и решать только тепловую задачу. Метод замораживания позволяет решить проблему очень большого времени счета для задачи пламенного обжига.

Идея метода замораживания заключается в следующем. Решается полная сопряженная задача для небольшого промежутка времени (10 сек) с очень мелким шагом по времени (0,001...0,1 сек). Для этого промежутка времени (10 сек) совместно решается нестационарная задача тепломассопереноса в газовой части и нестационарная задача теплопроводности в твердом теле. За 10 секунд обычно газоди-



намическая часть задачи выходит в квазистационарный режим, т.е. скорость движения газовой среды и коэффициенты теплообмена с твердым телом практически не меняются. Далее отключается решение уравнений для гидродинамических характеристик (скорости, давления, вязкости). Таким образом, поле скоростей замораживается, т.е. движение есть, но скорости не меняются во времени. Замораживание позволяет для этого фиксированного поля скоростей решать сопряженную задачу теплопереноса в газовой среде и нестационарной теплопроводности в твердом теле с большим шагом по времени (10 мин).

Т.к. поле температур все-таки имеет влияние на поле скоростей, то через определенный промежуток времени (4...12 ч), снова включается решение всех уравнений гидродинамики на небольшой промежуток времени (5-10 сек) с маленьким временным шагом (0,1 сек). После того как поле скоростей перестроилось и перестало заметно меняться, снова отключается решение уравнений гидродинамики и решается только задача теплопереноса с большим временным шагом. Блок-схема процесса решения приведена на рисунке 1.

Этот процесс перезапусков был автоматизирован с помощью написания специального скрипта на внутреннем языке программирования Star-CD.

Для моделирования пламенного обжига строилась модель всего электролизера, т.к. рассчитывалось движение газовой среды.

Модель электролизера для расчета пламенного обжига состоит из ячеек (около 550 000) и включает: катодное устройство, обожженные аноды со штангами, газовую среду между анодом и катодом, пространство борт-анод и верх анодов, засыпанное флотационным криолитом (рис.2)

Свойства твердых материалов при пламенном обжиге задаются аналогично свойствам при обжиге на коксе. Но при расчете этого вида обжига отпадает необходимость в задании электрического сопротивления материалов и появляется необходимость задания свойств воздуха, а также свойств реагентов и продуктов реакции для расчета реакции горения.

Основным веществом в газовой среде считается воздух. В газовую среду из горелок впрыскивается топливо ( $C_7H_{16}$ ) с воздухом ( $N_2+O_2$ ). Для упрощения задачи горения считается, что топливо и воздух выходят из горелки уже полностью смешанными.

Горение выражается реакцией:



Свойства воздуха и компонентов реакции берутся из базы данных расчетного пакета Star-CD. Для газовой среды дополнительно задается коэффициент поглощения 0.051/м, чтобы газовая среда не просто пропускала через себя тепловые потоки излучения, но и участвовала в теплообмене излучением.

Задаются ГУ: коэффициент теплоотдачи (конвекция + излучение) как функция температуры, температура окружающей среды (0°C), в местах установки горелок задается зависимость от времени скорости входящего потока - Inlet, в местах выхода газовой смеси в атмосферу корпуса задается нулевое давление. Задается начальная температура 0 °C.

Для проверки адекватности модели обжига использовались результаты измерений температуры термометрами на поверхности подины и внутри футеровки зало-

женными в неё термопарами. Сравнение результатов расчетов и измерений показало

удовле-  
твори-  
тельное  
совпаде-  
ние.

де-

С

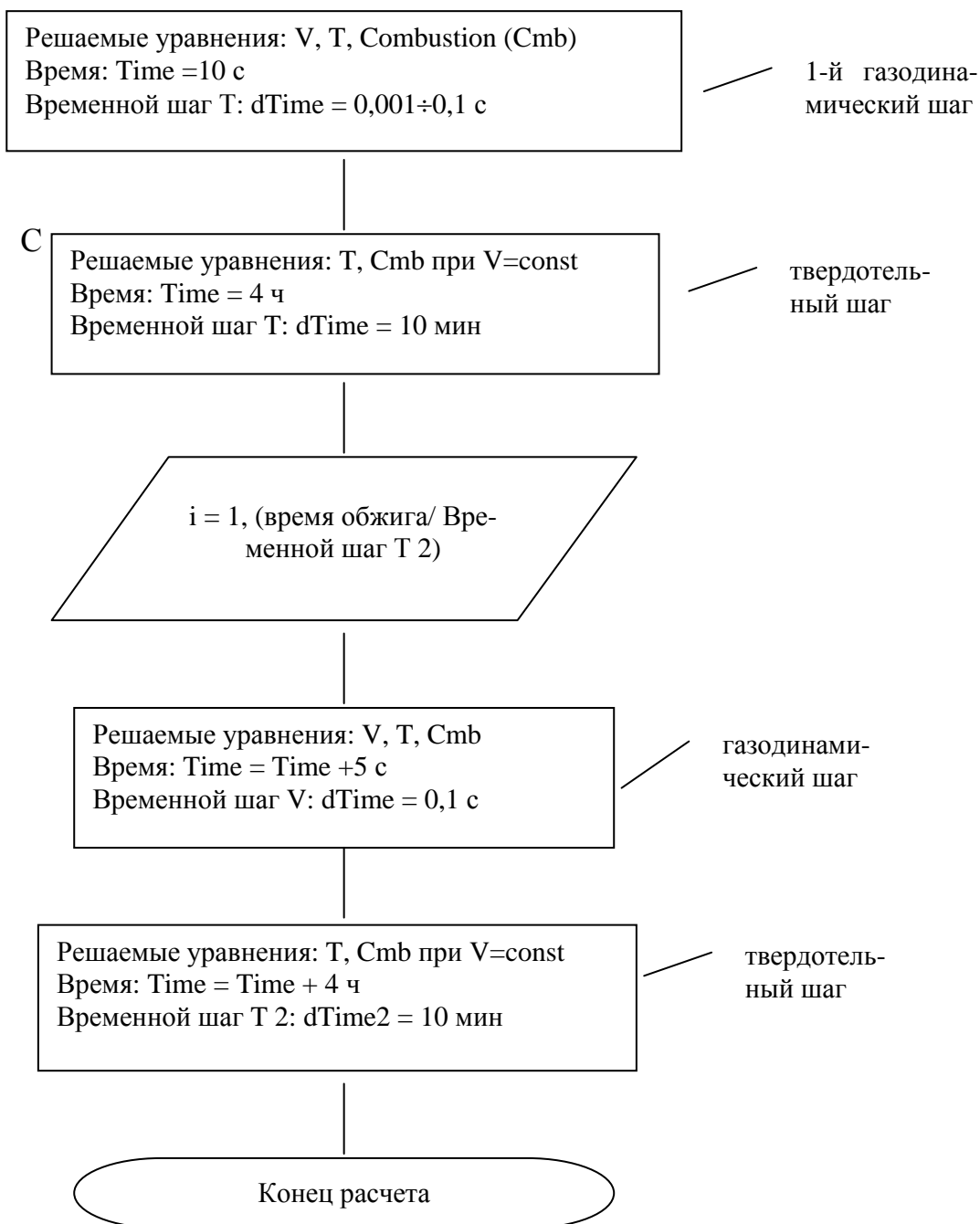


Рисунок 1. Блок схема методики расчета тепловых полей при пламенном обжиге с учетом тепломассопереноса и горения топлива с замораживанием поля скоростей, где V – решение всех уравнений, связанных с гидродинамикой: скорость, давление, плотность, вязкость; T – решение уравнений только для температуры; Combustion (Cmb) – решение уравнений горения топлива.

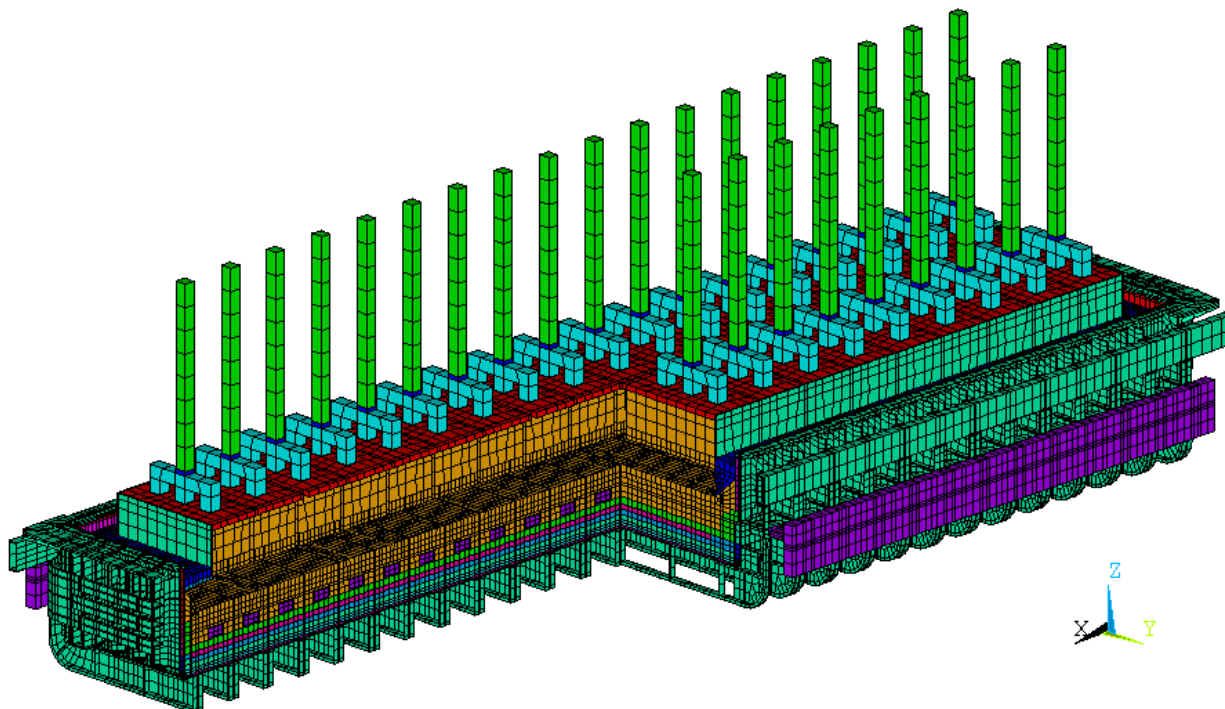


Рисунок 2. Конечно-объемная модель электролизера для расчета пламенного обжига

В последней части второй главы описывается методика расчета **напряженно-деформированного состояния катодного устройства**.

Модель для расчета НДС состоит только из катодного устройства.

Для решения термоупругопластической задачи обжига требуется задать модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность, диаграмму деформирования или предел текучести и модуль упрочнения, коэффициент термического линейного расширения материалов.

При расчете напряженно-деформированного состояния используется температурное поле, полученное от температурных расчетов и ограничения перемещений. Если происходит расчет четвертой части катода или половины, то на плоскостях сечения задается условие симметрии. В местах катодного кожуха, где он опирается на опорную раму, создается контактный слой, не позволяющий катодному устройству прогибаться вниз, но позволяющий свободно подниматься вверх.

По результатам расчета напряженно-деформированного состояния можно определить возможность разрушения катодного устройства, возможность нарушения целостности подины и многие другие параметры. Под целостностью катодного устройства понимается следующее:

- соблюдается целостность подины. Она хорошо обжата со всех сторон и нет раскрытия межблочных и периферийных швов;
- нет разрушений футеровки;
- катодный кожух сохраняет свою целостность, нет трещин и разрушений в катодном кожухе.

Возможность разрушения катодного кожуха оценивалась по критерию Мизеса:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq [\sigma] \quad (2)$$

При оценке целостности подины и возможности разрушения подовых блоков и швов используется критерий прочности Гольденблата-Копнова:

$$\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_p} - \frac{1}{\sigma_c} \right) (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{1}{\sigma_p} + \frac{1}{\sigma_c} \right)^2 (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) + \right. \\ \left. + \left[ 2 \left( \frac{1}{\sigma_p} + \frac{1}{\sigma_c} \right)^2 - 2 \frac{1}{\tau_B^2} \right] (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \sigma_z) + \frac{4}{\tau_B^2} (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right\}^{\frac{1}{2}} \leq 1 \quad (3)$$

$$\tau_B = \sqrt{\frac{\sigma_p \sigma_c}{2(1 + \mu)}} \quad (4)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – первое, второе и третье главное напряжение;  $\sigma_p, \sigma_c$  – предел прочности на растяжение и сжатие соответственно;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения по осям X, Y, Z;  $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xy}$  – касательные напряжения;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Если левая часть неравенства (4) меньше 1 материал не разрушается, если больше – разрушается.

**Глава 3** посвящена экспериментальным исследованиям физико-механических свойств подовой массы и коксового порошка.

Экспериментальные исследования физико-механических свойств подовой массы проводились на измерительных комплексах ИК-4, ТЭП и разрывной машине с электрической печью для нагрева образцов.

Измерительный комплекс ИК-4 с автоматизированным управлением и компьютерной обработкой результатов испытаний предназначен для определения натриевого расширения, КТЛР, термического расширения и усадки, прочности и модуля упругости на сжатие футеровочных материалов от комнатной температуры до 950°C.

Комплекс ТЭП с автоматизированным управлением и компьютерной обработкой результатов испытаний предназначен для измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) и коэффициента теплопроводности футеровочных материалов при температурах от комнатной до 950°C.

Измерительные комплексы аттестованы Красноярским центром метрологии и стандартизации, методики измерений – Уральским научно-исследовательским центром г. Екатеринбурга.

Для выполнения расчетов термоэлектрических полей и напряженно-деформированного состояния катодного устройства при обжиге электролизеров проведены экспериментальные исследования свойств подовой массы производства ОАО «РУСАЛ Красноярск»: прочность и модуль упругости при сжатии, теплопроводность, УЭС, термическое расширение и усадка.

Свойства подовой массы определялись: 1) В процессе обжига “зеленой” подовой массы; 2) В процессе нагрева обожженной подовой массы.

Для оценки влияния скорости обжига подовой массы на физико-механические свойства были исследованы 2 режима обжига:

**Режим 1:** нагрев до 950 °C со скоростью 100 °C/ч;

**Режим 2:** нагрев до 250 °C со скоростью 50 °C/ч, от 250°C до 950°C – со скоростью 200°C/ч;

Для коксовой крупки измерялись: теплопроводность, удельное электрическое сопротивление, удельное контактное сопротивление “крупка – графит”.

По результатам исследований для проведения термоэлектрических и прочностных расчетов электролизеров использовались следующие свойства подовой массы:

- теплопроводность:  $\lambda = 2,3074 - 0,0019 \cdot T + 6 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$  [Вт/м·К];
- УЭС:

$T_{\text{исп.}}^{\circ}\text{C}$	23	100	200	300	400	500	600	700	800	950
УЭС, мкОм·м.	8506	6419	2948	1441	935	421	202	44	28,9	26,4

- кажущаяся плотность «зеленого» образца 1,6 г/см<sup>3</sup>;
- кажущаяся плотность обожженного образца - 1,42 г/см<sup>3</sup>
- усадка в интервале температур 520 – 950°C - 0,36 %;
- модуль упругости:

$T_{\text{исп.}}^{\circ}\text{C}$	20	200	300	400	600	800	950
E, [МПа];	0	47,5	127,5	246	1142,5	1149,5	1359

- прочность на сжатие:

$T_{\text{исп.}}^{\circ}\text{C}$	20	200	300	400	600	800	950
$\sigma$ , [МПа];	0	1,67	4,09	5,06	12,91	17,94	23,54

Исследования влияния скоростей обжига подовой массы показали:

#### Теплопроводность

- чем медленнее скорость обжига подовой массы до 250°C, тем выше теплопроводность;
- значение теплопроводности подовой массы, обожженной по режиму 2, выше в 1,2 раза.

#### Удельное электрическое сопротивление, расширение и усадка

- не зависят от выбранных режимов обжига.

#### Прочность и модуль упругости

- не зависят от выбранных режимов обжига;

Проведены исследования удельной теплопроводности и электропроводности коксовой крупки и удельного контактного сопротивления «коксовая крупка – подовый блок»:

- удельная теплопроводность коксовой крупки:  
 $\lambda = 0,233 - 0,0002 \cdot T + 2 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$  [Вт/м·К];
- УЭС коксовой крупки:  $\rho = 4776,7 - 6,0798 \cdot T + 0,0031 \cdot T^2$  [мкОм·м];
- удельное контактное сопротивление «коксовая крупка – подовый блок»

$T_{\text{исп.}}^{\circ}\text{C}$	26	100	200	300	400	500
УСК, Ом·мм <sup>2</sup>	27,5	16,7	12,5	11,0	10,6	10,0

**В четвертой главе** рассмотрено влияние конструктивных и технологических факторов на температурное поле и целостность подины при обжиге на коксе.

Результаты сухих выбоек электролизеров, обожженных на коксе, показали, что прочность торцевых периферийных швов (ПШ) гораздо ниже, чем продольных. Это можно объяснить только разными условиями коксования подовой массы вследствие разных условий нагрева продольных и торцевых периферийных швов во время обжига. Сухие выбойки показали также, что на всех электролизерах после обжига на коксе образуются поперечные трещины в торцевых крайних и предпоследних подовых блоках.

Для оценки влияния различных технических решений на температурное поле электролизера во время обжига и, в частности, на температуру торцевых периферийных швов проведены различные расчетные исследования в конечно-элементном пакете ANSYS.

Расчеты проводились на модели электролизера с ОА на силу тока 300 кА с кожухом шпангоутного типа.

Проведены расчеты термоэлектрических полей и НДС для следующих вариантов (рисунок 3):

1. Исходный вариант конструкции электролизера с низкотеплопроводной подовой массой ( $1,6 \div 2,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°K)}$ ), подовые блоки с 30% содержания графита. Все остальные варианты соответствуют варианту 1, но со следующими изменениями.
2. Утеплена торцевая бровка путем замены части шамота на вермикулит.
3. Применена подовая масса с теплопроводностью в 4 раза выше.
4. Применены подовые блоки с содержанием графита 100%.
5. Диаметр анодных ниппелей увеличен со 140 до 180 мм.
6. Крайние аноды сдвинуты до шапочки торцевого периферийного шва.
7. Крайние аноды сдвинуты до шапочки, а предпоследние – на половину расстояния, на которое были сдвинуты крайние аноды.
8. Уменьшена толщина торцевого шва (со 155 до 90 мм).
9. Увеличена жесткость потая между блюмсами, модуль упругости повышен с 10 до 100 МПа.
10. Применен вариант 2, но используется вермикулит с плотностью  $600 \text{ кг/м}^3$  вместо  $350 \text{ кг/м}^3$ .

Результаты термоэлектрических расчетов приведены в таблице 1. Из анализа результатов расчетов температурных полей, можно отметить, что лучшими с точки зрения увеличения температуры торцевого периферийного шва являются варианты 2, 4, 6 и 7, с точки зрения снижения температурного градиента предпочтительны варианты 4, 6 и 7.

Окончательную оценку эффективности различных вариантов обжига и конструкции футеровки можно дать только после проведения расчета напряженно-деформированного состояния.

Для оценки целостности подины проведены расчеты НДС с температурными полями, полученными для каждого варианта. Результаты расчетов представлены в таблице 1. В таблице 2 направление X – направление вдоль продольной оси электролизера, Y – направление вдоль поперечной оси электролизера, Z – вертикальное направление.

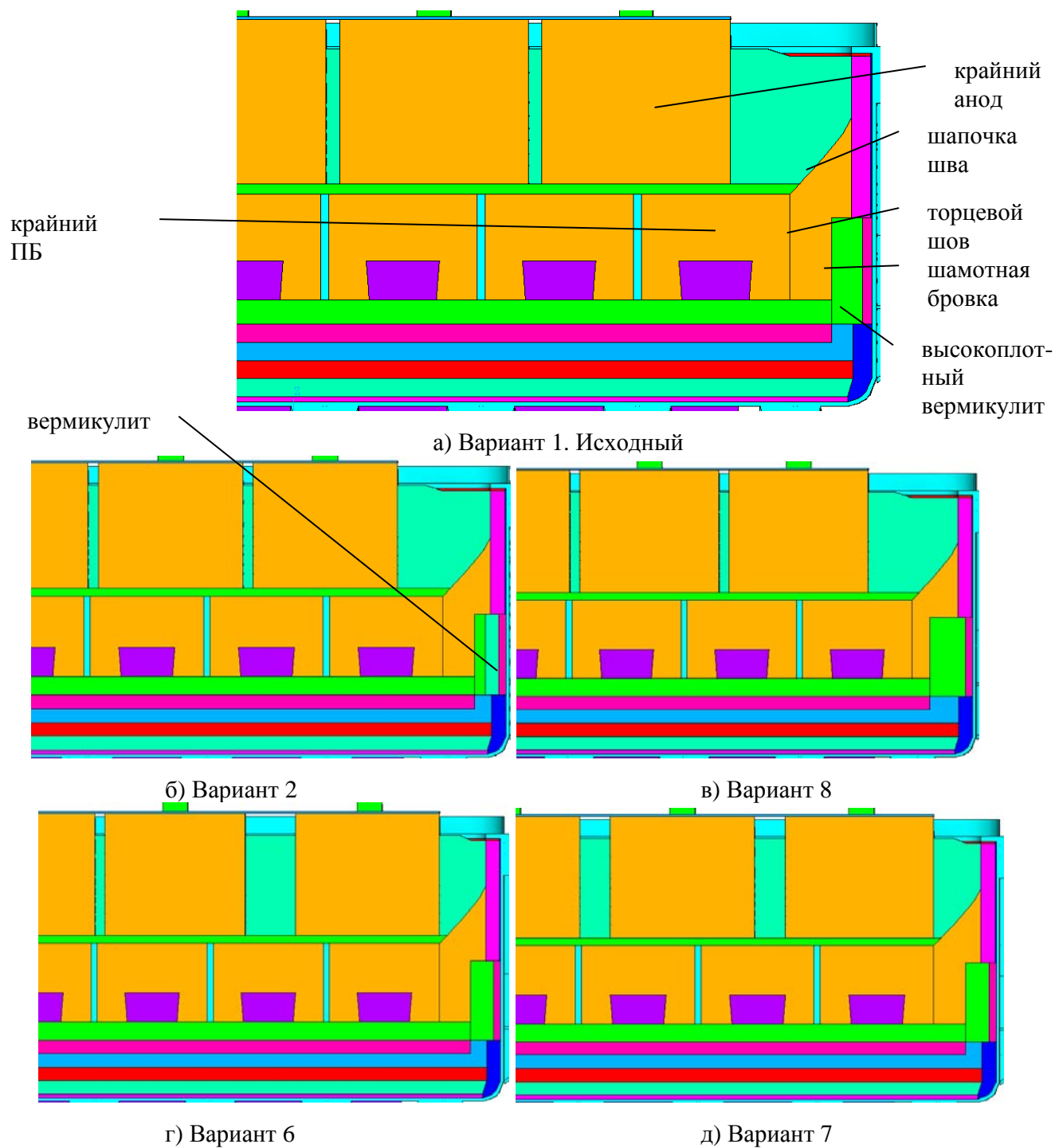


Рисунок 3. Варианты расчета

Таблица 1. Результаты термоэлектрических расчетов катодного устройства

Температура, °C	№ варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Максимальная подины	998	998	1012	1022	996	1004	992	998
Центр крайнего подового блока	586	578	518	668	585	589	637	567
Максимальный градиент на поверхности крайнего ПБ по оси X**, К/мм	0,84	0,82	1,24	0,22	0,84	0,74 (0,47)*	0,78 (0,51)*	0,84
Зона периферийного шва по середине продольной стенки								
Верх торца подового блока	732	732	550	906	731	713	707	732
Низ торца подового блока	613	613	545	880	613	593	587	613
Центр продольного периферийного шва	625	625	525	840	625	598	592	625
Зона периферийного шва по середине торцевой стенки								
Верх боковой поверхности подового блока	405	420	272	624	405	472	507	404
Низ боковой поверхности подового блока	418	440	334	631	417	444	479	415
Центр торцевого периферийного шва	360	396	298	532	360	385	413	361

\*в скобках указаны градиенты на поверхности подового блока, там, где в остальных вариантах находится максимум

\*\* ось X направлена вдоль электролизера.

Таблица 2. Результаты расчетов НДС при обжиге на коксе

Направление перемещения	№ варианта								
	1	2	3	4	6	7	8	9	10
Перемещение кожуха, мм									
Верх торцевой стенки в направлении X	7,3	6,0	8,0	8,5	7,7	7,9	8,4	7,1	7,7
Торцевая стенка на уровне середины ПБ в направлении X	8,9	6,8	9,2	10,8	9,2	9,4	10,2	8,8	9,3
Верх продольной стенки в направлении Y	8,8	9,5	9,9	11,8	8,8	8,7	9,6	9,4	9,6
Центр днища в направлении Z	2,9	3,2	3,2	4,0	2,9	2,9	3,3	3,1	3,3
Перемещение подины, мм									
Верх крайнего ПБ в направлении X	12,4	15,1	13,2	12,1	11,6	11,5	12,2	12,2	12,9
Продольный прогиб крайнего ПБ	1,9	2,3	1,7	2,1	2,0	2,0	1,6	1,8	1,9
Торец среднего ПБ в направлении Y	6,1	6,1	5,9	7,0	6,1	6,0	6,2	6,4	6,1
Центр верха подины в направлении Z	5,7	5,9	5,9	7,7	5,6	5,5	5,9	5,4	5,9
Напряжение в направлении Y (поперек ванны), МПа									
Край подового блока (ПБ)	4,1	4,5	5,9	-1,1	1,3	0,9	2,6	4,9	3,4
В подовой массе на стыке с крайним ПБ, торец	-0,1	-0,4	-0,2	0,58	-0,1	0,3	0	0	-0,1
Критерий прочности									
Максимум в ПМ	3,8	4,1	3,1	4,7	3,6	3,3	3,7	4,2	3,9
Максимум в ПБ	0,88	1,05	1,03	0,55	0,75	0,74	0,76	0,92	0,84
Максимум края последнего ПБ	0,55	0,59	0,86	0,21	0,33	0,32	0,33	0,66	0,44

Результаты расчетов температурных полей и НДС электролизера при обжиге на коксе позволяют сделать следующие выводы:

1. Наибольшую опасность с точки зрения нарушения целостности подины во время обжига представляют растягивающие напряжения в крайних ПБ и торцевых периферийных швах даже при правильно выбранной конструкции футеровки и при соблюдении технологии обжига;

2. Возникновение опасных напряжений в крайних ПБ и торцевых периферийных швах обусловлено большим градиентом температуры и недостаточным сопротивлением торцевого шва и бровки деформациям сжатия после обжига, т.е. низкой жесткостью периферийной торцевой футеровки.

3. Для снижения опасных напряжений в торцевой части подины предложены следующие технические решения:



- а) повышение жесткости периферийной торцевой футеровки за счет утепления торцевой бровки более жесткими материалами;
- б) сдвиг 4 или 8 крайних анодов к торцевому шву;
- в) использование графитовых или графитизированных ПБ;
- г) уменьшение ширины торцевого периферийного шва.

4. Использование более теплопроводной массы оказывает негативное влияние на целостность торцевого периферийного шва и крайнего подового блока, однако положительно влияет на целостность продольного периферийного шва.

5. Использование ниппелей анододержателей большего диаметра практически не оказывает влияние на температурное поле после обжига.

6. Наиболее эффективным и технологичным способом снижения растягивающих напряжений в крайних подовых блоках является сдвиг крайних анодов ближе к торцевым швам.

**В пятой главе** рассматривается влияние технологии и свойств используемых футеровочных материалов на целостность подины при пламенном обжиге.

Проводится расчет температурного поля электролизера с учетом газодинамики газовоздушной среды и горения топлива во время пламенного обжига в пакете Star-CD. С полученными температурными полями проводится расчет НДС катодного устройства в ANSYS.

Расчет проводился на модели электролизера с ОА на силу тока 300 кА с кожухом шпангоутного типа.

Проведены расчеты температурных полей для следующих вариантов:

- 1) Исходный вариант конструкции электролизера с 30% содержанием графита в подовых блоках. Пространство борт-анод (ПБА) засыпано полностью оборотным криолитом, Пространство торец-анод (ПТА) засыпано до границы торцевой шов – подовый блок.

Все остальные варианты соответствуют варианту 1, но со следующими изменениями.

- 2) ПТА засыпано дробленным оборотным криолитом от бортовых блоков до крайних анодов.
- 3) Торцевой шов открыт, ПТА закрыто теплоизоляционной плитой ПКВ только сверху.
- 4) Открыты как торцевые, так и продольные швы.
- 5) ПБ со 100% графита.
- 6) ПБ графитизированные.
- 7) Сокращение времени обжига с 64 до 50 часов с увеличением скорости обжига после 35 часов в 1,5 раза и плавным увеличением до 1,67 раза к концу обжига.

Результаты расчетов температурного поля представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты температурных расчетов пламенного обжига

Параметры	№ варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
Максимальная температура подины, °С	1050	1011	969	932	1061	1055	998
Средняя температура поверхности подины, °С	892	846	817	757	911	918	827
Средняя температура низа подины, °С	639	606	586	595	795	831	527
Разность м/у верхом и низом, °С	253	240	231	162	116	87	300
Расход топлива на обжиг, кг	6970	6970	6970	6970	6970	6970	5715
Температура по середине продольной стенки, °С (входная/выходная сторона)							
Верх ПБ на границе с периферийным швом	626/ 656	633/ 613	630/ 597	820/ 624	757/ 794	739/ 725	581/ 599
Низ ПБ на границе с периферийным швом	453/ 472	467/ 453	465/ 430	609/ 605	690/ 707	729/ 715	376/ 386
Периферийный шов. Центр	529/ 553	540/ 522	508/ 475	483/ 496	746/ 767	764/ 750	467/ 480
Среднеобъемная температура продольных периферийных швов, °С	344	332	331	586	465	499	306
Температура по середине торцевой стенки °С (глухой/лицевой торец)							
Верх ПБ	568/ 576	300/ 294	813/ 706	639/ 599	701/ 712	823/ 797	575/ 576
Низ ПБ	458/ 464	331/ 328	550/ 460	407/ 411	670/ 679	779/ 755	400/ 400
Периферийный шов центр	505/ 513	331/ 326	644/ 550	497/ 488	708/ 718	830/ 806	477/ 477
Среднеобъемная температура торцевых периферийных швов, °С	358	209	587	490	495	525	366
Температура катодного кожуха, °С							
Максимальная торцевой стенки	143	77	557	437	182	187	165
Максимальная продольной стенки	160	160	160	564	202	198	165

Из анализа рассчитанных вариантов можно сделать следующие заключения:

- 1) Засыпка ПБА и ПТА теплоизоляционным материалом приводит к снижению температуры продольных и торцевых стенок.
- 2) Засыпка ПТА теплоизоляционным материалом до торцевых анодов с закрытием части крайних ПБ приводит к значительному снижению температуры торцевого периферийного шва.
- 3) Применение более теплопроводных ПБ приводит к следующим положительным результатам: более эффективному использованию топлива; увеличению температуры поверхности подины и снижению разности температуры по поверхности и высоте блока; повышению температуры торцевого периферийного шва. Отрицательными последствиями являются увеличение температуры продольных периферийных швов и стенок кожуха.
- 4) Снижение времени нагрева с 64 до 50 часов при увеличении интенсивности нагрева приводит к уменьшению температуры поверхности подины и увеличению разности температуры по высоте ПБ. При снижении средней температуры поверхности подины на 65°С, разность между средними температурами верха и низа подины выросла на 47°С.

Окончательную оценку эффективности различных вариантов обжига и конструкций можно дать только после проведения расчета НДС (таблица 4).

Таблица 4. Результаты расчета НДС

Зона и направление перемещения	№ варианта						
	1	2	3	4	5	6	7
Перемещение кожуха, мм							
Верх торцевой стенки в направлении X	9,3	8,2	13,4	32,4	9,9	12,4	8,3
Верх торцевой стенки на уровне середины ПБ в направлении X	8,7	7,7	8,32	13,7	9,7	12,2	7
Верх продольной стенки в направлении Y	10,5	9,7	9,14	12	12,3	14,7	8,8
Центр днища в направлении Z	2,5	2,2	2,5	82,9	1,6	3,1	2,8
Перемещение подины, мм							
Верх крайнего ПБ в направлении X	10,7	11,7	9	18,1	10,5	13,4	9
Продольный прогиб крайнего ПБ	1,5	1,7	2	-0,3	1,3	1,9	1,3
Торец среднего ПБ в направлении Y	5,8	5,5	5,1	4,9	6,1	8,3	5,1
Центр верха подины в направлении Z	5,2	4,9	5,1	86	5	7,2	5
Нормальное напряжение, МПа							
Край ПБ в направлении Y	1,2	6,3	-1,5	-1,0	0,7	-2	0,5
SY ПМ торец	0,8	0,1	2,9	1,2	1,0	1,8	0,63
Критерий прочности							
Максимальное значение в ПМ	2,9	3,3	5,1	6,1	3,4	2,7	2,63
Максимальное значение в ПБ	1,3	1,53	0,94	0,99	1,05	0,84	1,3
Максимальное значение края последнего ПБ	0,4	1,07	0,51	0,2	0,41	0,43	0,34

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

- засыпка ПТА до края анода приводит к изоляции части поверхности торцевого ПБ, большому перепаду температуры в торцевых блоках и низкой температуре торцевых периферийных швов. Все это вызывает большие растягивающие напряжения в крайних блоках и их разрушение;
- полное исключение засыпки в ПТА приводит к перегреву торцевой стенки катодного кожуха и большой её деформации. Из-за большого изгиба торцевой стенки возникает опасность появления продольных трещин в шапочке торцевого периферийного шва или отрыва шапочки от карбидокремниевых плит;
- полное исключение засыпки в ПБА приводит к сильному перегреву продольных стенок катодного кожуха и их большому изгибу и подъему подины, что в свою очередь приводит к опасности раскрытия межблочных и периферийных швов. При одинаковом расходе топлива при открытых ПБА и ПТА значительно снижается температура подины, вследствие большого ухода тепла в борта;
- применение графитизированных ПБ и графитовых с содержанием графита 100% существенно не улучшает обжиг подины при правильной технологии обжига, но вероятно, улучшает её при не оптимальной технологии. Другим преимуществом при использовании 100% графитовых блоков является более равномерный нагрев подины по высоте блока. При такой же температуре поверхности подины среднеобъемная температура подины стала на 100°C выше, что оказывает положительное влияние на показатели пуска электролизера, такие как пусковое напряжение и уровень шума.
- сокращение времени обжига с 64 до 50 часов с увеличением интенсивности обжига после 35 часов в 1,5 раза и плавным увеличением до 1,67 раза к концу обжига не приводит к каким-либо ухудшениям целостности подины в конце обжига по сравнению с 64 часовым графиком. Однако из-за худшего прогресса подины уве-

личение интенсивности обжига отрицательно скажется при пуске ванны: высокое пусковое напряжение, высокий шум.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

Выводы по измерению свойств:

- уменьшение скорости обжига подовой массы в интервале температур 0-250°C приводит к увеличению её теплопроводности. Теплопроводность подовой массы, обожженной до 250°C со скоростью нагрева 50°C/ч (режим 1), выше в 1,2 раза, чем при скорости нагрева 100°C/ч (режим 2);
- удельное электрическое сопротивление, расширение и усадка, прочность и модуль упругости не зависят от выбранных режимов обжига;

Выводы по обжигу на коксе:

- при соблюдении технологии обжига наибольшую опасность с точки зрения нарушения целостности подины во время обжига электролизера с подовыми блоками с 30% содержанием графита представляют растягивающие напряжения в крайних подовых блоках. При использовании 100% графитовых или графитизированных блоков опасность разрушения крайних подовых блоков значительно снижается;
- наиболее эффективным и технологичным способом снижения растягивающих напряжений в крайних подовых блоках и повышения качества коксования торцевого периферийного шва является сдвиг крайних анодов ближе к торцу;

Выводы по пламенному обжигу:

- вариант укрытия периферии, при котором ПБА засыпано полностью оборотным криолитом до границы продольный периферийный шов – подовый блок, а ПТА засыпано до границы торцевой шов – подовый блок является оптимальным с точки зрения сохранения целостности подины и расхода топлива;
- большее время обжига с периодом "насыщения" в конце, предпочтительней с точки зрения лучшего прогрева подины по высоте;
- применение более высокотеплопроводных подовых блоков приводит к лучшему прогреву подины по высоте, а также снижает возможные отрицательные последствия для целостности подины при отклонениях в технологии обжига;
- потай в подовых секциях необходимо выполнять из податливого материала, а также уменьшить сопротивление скольжения блюмсов в продольном периферийном шве и бровке для компенсации температурного расширения блюмсов вдоль длины.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Архипов А.Г., Поляков П.В., Архипов Г.В. Влияние технологических и конструктивных параметров на целостность подины алюминиевых электролизеров при пламенном обжиге // Известия вузов. Цветная металлургия. 2010, №3.
2. A. Arkhipov, G. Arkhipov, and V. Pingin. Influence of Technological and Constructive Parameters on the Integrity of the Bottom of Aluminum Reduction Cells during Flame Preheating // TMS Light Metals, 2011, pp. 1047-1052.

3. S. Akhmetov, D. Whitfield, M. M. Al-Jallaf, A. Al-Zarouni, A. Arkhipov, A. Al-Redhwan, W. Abou Sidou. D18+: potline modernization at DUBAL // TMS Light Metals, 2013, pp. 561-565.
4. A. Zarouni, L. Mishra, M. Bastaki, A. Al Jasmi, A. Arkhipov, V. Potocnik. Mathematical model validation of aluminium electrolysis cells at DUBAL // TMS Light Metals, 2013, pp. 597-602.

Прочие публикации и работы:

5. Патент № 2178884 «Установка для исследования физико-механических свойств угольных продуктов» по заявке № 2001102063 от 23.01.2001 г.
6. Патент № 2303653 «Способ обжига подины алюминиевого электролизера» по заявке № 2005126099 от 17.08.2005 г.
7. Патент № 2318920 «Способ обжига подины алюминиевого электролизера» по заявке № 2006114245 от 26.04.2006 г.
8. Применение математического моделирования для модернизации и разработки электролизеров САЗа / Архипов Г.В., Третьяков Я.А., Архипов А.Г., Платонов В.В. // Техничко-экономический вестник "Русского Алюминия" №6/ Красноярск: "Сиенит-КрАЗ", 2004 г. с. 14 – 20.
9. Расчет алюминиевых электролизеров при обжиге, пуске и послепусковом периоде / А.Г. Архипов, П.В. Поляков // Алюминий Сибири – 2004 г.: Сб. научн. статей / Красноярск: «Бона компани», 2004 г. с. 149 – 155.
10. Применение математического моделирования при проектировании электролизера РА-300 / Г.В. Архипов, В.В. Пингин, В.В. Платонов, Я.А. Третьяков, Архипов А.Г. // Алюминий Сибири – 2004 г.: Сб. научн. статей / Красноярск: «Бона компани», 2004 г. с. 149 – 155.
11. А.Г. Архипов, П.В. Поляков. Применение ANSYS для расчета алюминиевых электролизеров при обжиге. // Сборник трудов Четвертой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH (Москва, 21-22 апреля 2004 г.). / Под ред. А. С. Шадского. - М.: Полигон-пресс, 2004. - С. 323-329
12. Литвинцев К.Ю., Архипов А.Г. Оптимизация физико-математической модели пламенного обжига подины. // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики. VIII Всероссийская конференция молодых ученых. Тезисы докладов. Новосибирск, 2004. ИТ СО РАН
13. Разработка модели пламенного обжига с учетом газодинамики газовой среды и горения топлива / А.Г. Архипов, П.В. Поляков, А.А. Дектерев, К.Ю. Литвинцев // Алюминий Сибири – 2005 г.: Сб. научн. статей / Красноярск: «Бона компани», 2005 г. с. 9 – 14.
14. Напряженно-деформированное состояние подовых блоков и обожженных анодов алюминиевого электролизера/ А.Г. Архипов, П.В. Поляков. // Сборник трудов пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH (Москва, 21-22 апреля 2005 г.). / Под ред. А. С. Шадского. - М.: Полигон-пресс, 2004. - С. 390-398.
15. Влияние технологических и конструктивных параметров на целостность подины при электрическом и пламенном обжиге / А.Г. Архипов, П.В. Поляков // Алюминий Сибири – 2008 г.: Сб. научн. статей / Красноярск: «Версо», 2008 г. с. 12 – 28.

16.Изучение обжига алюминиевых электролизеров при помощи математического моделирования / А.Г. Архипов, П.В.Поляков // Вестник СибГАУ. Выпуск 1(14) / Красноярск: Город.